

外源生长调节剂对高粱光合参数及产量的影响

王佳旭,张 飞,王艳秋,邹剑秋,朱 凯,张志鹏,卢 峰

(辽宁省农业科学院高粱研究所, 辽宁 沈阳 110161)

摘 要:于 2019—2020 年以辽粘 3 号高粱品种为试材,采用不同浓度延缓型(烯效唑)和促进型(胺鲜酯)生长调节剂,于高粱 8~10 叶期进行叶面喷施处理,分析产量、农艺性状、光合作用及叶绿素荧光参数。结果表明,喷施促进型生长调节剂胺鲜酯的高粱产量与对照无差异,喷施延缓型生长调节剂烯效唑可显著提高高粱产量,增产 3.17%~13.51%,喷施 60 mg·L⁻¹烯效唑时产量最高(8 989.49 kg·hm⁻²),这一处理株高降低 19.72%,茎粗、穗长和干物质质量较对照分别增加 24.12%、22.13%和 7.02%,产量与干物质质量呈极显著正相关($R=0.94^{**}$);灌浆期功能叶片叶绿素 SPAD 值增加 17.45%,净光合速率较对照增加 8.37%~13.60%;叶绿素荧光参数 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和 qP 分别较对照显著增加 2.12%、20.50%和 41.50%, F_v/F_0 、 F_v/F_0 和 qP 与产量呈显著正相关。总体而言,叶面喷施烯效唑 60 mg·L⁻¹(225 L·hm⁻²)可提高高粱的光系统电子传递效率,从而提高群体光合效率,优化源库关系,实现较高产量。

关键词:高粱;烯效唑;胺鲜酯;产量;光合性能

中图分类号:S514;S143.8;S311 **文献标志码:**A

Effects of exogenous growth regulators on photosynthetic parameters and yield of sorghum

WANG Jiaxu,ZHANG Fei,WANG Yanqiu,ZOU Jianqiu,ZHU Kai,ZHANG Zhipeng,LU Feng
(Sorghum Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang, Liaoning 110161, China)

Abstract: In this study, the sorghum variety Liaonian 3 was used as the test material from 2019 to 2020. Different concentrations of retarding (Uniconazole) and promoting (Diethyl aminoethyl hexanoate) growth regulators were used to analyze yield, agronomic traits, photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters. The result showed that there was no difference in the yield of spraying Diethyl aminoethyl hexanoate. The spraying of Uniconazole growth regulator significantly increased the yield by 3.17%~13.51%. When spraying 60 mg·L⁻¹ Uniconazole, the yield reached the maximum(8 989.49 kg·hm⁻²), and the plant height was reduced 19.72% in this treatment, stem thickness, ear length and dry matter quality were increased by 24.12%、22.13% and 7.02%, and the yield and dry matter were significantly positively correlated ($R=0.94^{**}$). During the filling stage, the chlorophyll SPAD value of functional leaves increased by 17.45%, and the net photosynthetic rate increased by 8.37%~13.60% compared with the control. Simultaneously, the chlorophyll fluorescence parameters were improved, and F_v/F_m , F_v/F_0 and qP were significantly increased by 2.12%、20.50% and 41.50% compared with the control. The F_v/F_m , F_v/F_0 and qP were significantly positively correlated with yield. In general, the application of Uniconazole 60 mg·L⁻¹(225 L·hm⁻²) in sorghum improved electron transfer efficiency and the population photosynthesis, optimized the source-sink relationship and achieved higher yield.

Keywords: sorghum; uniconazole; diethyl hexanoate; yield; photosynthetic fluorescence

高粱是全球第五大谷类作物,具有光合与水分利用效率高等特点^[1-2]。作为酿造业的主要原料,目前我国酿造高粱的生产总量无法满足酿造业需求,因此提高酿造高粱籽粒产量,对我国高粱产业发展尤为重要^[3-5]。研究植物生长调节剂对高粱生长发育的影响,从源库关系角度剖析调节剂增产的作用机理,确定酿造高粱适宜生长调节剂及施用浓度,对酿造高粱的高产栽培具有重要意义。

应用植物生长调节剂可以有效改善作物的生长发育,通过影响内源激素合成、光合生理特性等,增“源”扩“库”,进而提高产量^[6-9]。前人研究指出^[10-12],植物生长调节剂可以通过内源植物激素信号和调控优化植物结构,显著降低株高和穗位高,最终提高产量。已有研究表明,玉米-大豆套作模式下,植物生长调节剂的应用促进了大豆源端光合同化物的输出,提高了干物质积累量和籽粒产量^[7,13-16]。适宜浓度的生长调节剂具有促进高粱生理代谢和提高光合性能的作用,最终增加籽粒产量^[17-20]。薛丁丁等^[20]研究表明,二叶期喷施 200~300 mg·L⁻¹ 烯效唑,既可以提高甜高粱抗倒性,又可以增加生物产量。王桂青^[21]研究认为,抽穗前期喷施乙稀利可使高粱株高降低 29 cm,穗粒数增加 354 粒,增产 12.3%。吴琼等^[22]研究表明,叶面喷施植物生长调节剂 B2 可提高叶片叶绿素 SPAD 值、净光合速率和蒸腾速率,提高电子传递效率及最大光化学效率。烯效唑是一种三唑类植物生长延缓剂,是赤霉素合成抑制剂,具有高效低毒、控制营养生长、矮化植株等作用,在玉米、小麦、水稻和果树栽培中均有广泛应用^[23]。

随着我国农业快速发展,在选育高产高效新品种的同时,挖掘现有高粱品种产量潜力也是研究重点^[1,3,5]。源库平衡是作物高产的重要前提,生产中通过协调源库关系来实现作物高产^[16]。目前关于高粱生长调节剂的效果研究主要以农艺性状为主^[17-20],而植物生长调节剂对高粱源库调控效应鲜见报道。本研究以酿造高粱辽粘 3 号为材料,通过分析不同浓度生长调节剂对酿造高粱光合作用参数、叶绿素荧光参数及干物质积累特征的影响,解析生长调节剂增产的作用机理,挖掘辽粘 3 号增产潜力,并为其配套栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试验地点

试验材料选用酿造高粱品种辽粘 3 号,由辽宁省农科院高粱研究所选育并提供。试验于 2019 —

2020 年在陕西省榆林市 (107° 28' ~ 111° 15' E, 36°57'~39°34'N) 进行,属温带和暖温带半干旱大陆性季风气候,海拔高度 1 000 m,无霜期 150 d 左右。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计,3 次重复。辽粘 3 号种植密度 120 000 株·hm⁻²,小区行长 5 m,行距 0.50 m,6 行区。土壤类型为黄绵土,播前土壤养分值为:有机质 4.8 g·kg⁻¹,全氮 0.31 g·kg⁻¹,全磷 0.47 g·kg⁻¹,全钾 19.43 g·kg⁻¹,硝态氮 8.07 mg·kg⁻¹,铵态氮 10.28 mg·kg⁻¹,速效磷 32.7 mg·kg⁻¹,速效钾 72 mg·kg⁻¹,pH 8.27。播种前施基肥 N (150 kg·hm⁻²)、P₂O₅ (120 kg·hm⁻²)、K₂O (90 kg·hm⁻²),常规田间管理。

植物生长调节剂选用延缓型生长调节剂烯效唑 (S-3307,可湿性粉剂,有效含量 5%) 和促进型生长调节剂胺鲜酯 (DA-6,可溶粉剂,有效含量 8%)。于高粱 8~10 叶期 (拔节期,幼苗根部 2 cm 处有明显节) 选择晴朗无风天气,人工叶面喷施生长调节剂,喷施剂量为 225 L·hm⁻² (表 1),以施清水为对照 (CK)。

表 1 供试生长调节剂类型及浓度

Table 1 Type and concentration of growth regulators tested		
类型 Type	处理 Treatment	浓度/(mg·L ⁻¹) Concentration
延缓型调节剂 (烯效唑) Retarded growth regulator (Uniconazole)	S1	40
	S2	60
	S3	80
促进型调节剂 (胺鲜酯) Promoting growth regulator (Diethyl aminoethyl hexanoate)	D1	40
	D2	60
	D3	80

1.3 试验地气象条件

本试验于 2019 年 5 月 13 日播种,10 月 8 日收获;2020 年 5 月 3 日播种,10 月 4 日收获。图 1 为生育期平均温度及降雨量。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 农艺性状 灌浆期测定各处理农艺性状,采用高度测量尺测定株高和穗长,数显游标卡尺测定茎粗,茎粗测定位置为基部上数第 5 节,每处理测定 10 株,3 次重复。

1.4.2 叶绿素 SPAD 值 高粱灌浆期测定,采用 SPAD-502 便携式叶绿素仪 (Konica Minolta,日本) 测定各处理高粱倒三叶叶片叶绿素 SPAD 值,3 次重复。

1.4.3 光合作用参数 灌浆期选择晴朗无云的天气,采用光合作用测定系统 (CIRAS-3 型, Hansatech,英国) 进行相关参数测定,测定每处理倒

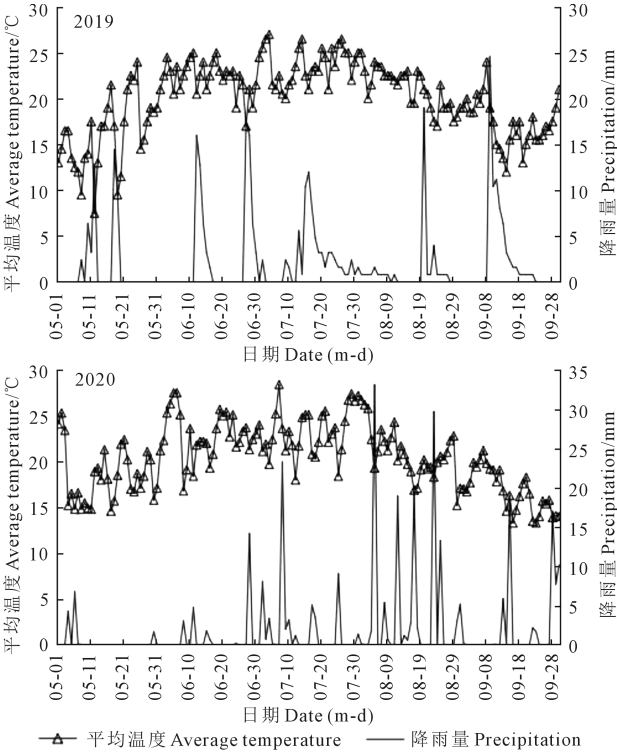


图 1 2019 年和 2020 年高粱生育期平均温度和降雨量
Fig.1 Average temperature and precipitation during sorghum growth period in 2019 and 2020

二叶叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(E)、气孔导度(G_s)、胞间二氧化碳浓度(C_i)和水分利用效率(WUE),3 次重复。测定时设定光合仪内置参数:光照强度为 $1200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (红光:蓝光 = 9:1), CO_2 浓度为 $380\ \text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。叶片水分利用效率(WUE)= 净光合速率(P_n)/蒸腾速率(E)。

1.4.4 叶绿素荧光参数 叶绿素荧光参数测定时间与光合作用参数一致。采用超便携式调制叶绿素荧光仪(MINI-PAM 2000, WALZ, 德国),暗处理 30 min 后测定,测定位置为每处理倒二叶叶片。

1.4.5 干物质积累 在拔节期(即喷施后 0 d),喷施后 20、40、60、80、100 d 取样。每处理选取长势均匀一致的植株 3 株,105℃ 杀青 1 h,80℃ 烘干至恒重,测定干物质重量。

1.4.6 产量 成熟期收获小区中间 4 行,风干后脱粒称重。采用籽粒水分测定仪测定籽粒含水量,计算单位面积标准水分(14%)籽粒产量,3 次重复。

1.5 数据处理

本研究采用 DPS V9.01 数据处理系统进行二因素试验统计分析,处理间多重比较采用 LSD 法。采用 Origin 2018 软件进行图表处理。

2 结果与分析

2.1 生长调节剂对高粱产量及农艺性状的影响

两年试验结果表明,调节剂浓度和年份均显著影响高粱产量($P<0.05$),二者互作对高粱产量的影响并未达到显著差异(表 2)。喷施烯效唑(S)调节剂增产效果显著,随着喷施浓度的增加,产量呈先升后降趋势,说明过高浓度生长调节剂抑制辽粘 3 号籽粒的形成。2019 年, S1、S2 和 S3 产量分别比 CK 增加了 1.45%、13.73% 和 0.76%;2020 年产量分别增加了 9.52%、13.28% 和 5.58%。胺鲜酯(D)调节剂处理产量小于 CK,2019 年产量变化幅度为 $6\ 868.43\sim7\ 853.93\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,2020 年产量变化幅度为 $7\ 448.43\sim7\ 626.27\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

两年试验结果表明,喷施生长调节剂显著降低辽粘 3 号株高,显著增加茎粗和穗长,二者互作仅对茎粗有显著影响。喷施浓度为 $60\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时(S2、D2),株高极显著降低,且烯效唑株高降低幅度高于胺鲜酯,喷施烯效唑调节剂的处理株高降低了 5.58%~19.72%;喷施胺鲜酯调节剂的处理株高降低了 0.54%~15.49%。调节剂浓度越高,辽粘 3 号茎粗越低。S1、D1 茎粗比 CK 增加了 18.41%~24.12%、18.41%~18.96%。喷施生长调节剂,辽粘 3 号穗长均有不同程度增加。烯效唑调节剂穗长增加了 10.48%~22.13%,胺鲜酯调节剂穗长增加了 11.05%~16.86%。

2.2 生长调节剂对高粱干物质积累的影响

由图 2 可知,不同处理干物质积累动态特征一致,随着生育时期的推进,辽粘 3 号干物质质量逐渐增加,成熟期达到最大值,年际间表现趋势相同。喷施生长调节剂可提高辽粘 3 号干物质积累,调节剂浓度过高,对单株干物质积累产生一定的抑制作用。喷施烯效唑(S)提升效果显著,成熟期单株干物质质量比 CK 增加了 1.26%~7.02%,胺鲜酯(D)全生育期单株干物质质量与 CK 间基本无差异。

2.3 生长调节剂对高粱叶绿素相对含量的影响

由图 3 可知,喷施生长调节剂显著增加辽粘 3 号灌浆期叶绿素 SPAD 值,随着喷施浓度的提高,叶绿素 SPAD 值逐渐降低,年际间变化趋势相同。两种生长调节剂处理间无显著差异。延缓型生长调节剂烯效唑(S)叶绿素 SPAD 值比 CK 增加了 4.93%~17.45%,促进型生长调节剂胺鲜酯(D)比 CK 增加了 6.82%~16.33%。

2.4 生长调节剂对高粱光合作用参数的影响

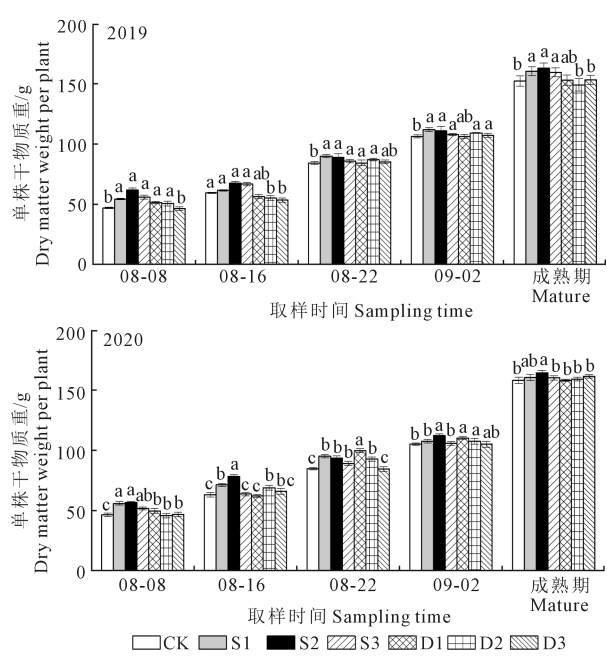
由表 3 可知,不同生长调节剂处理对高粱光合作用参数均有显著影响($P<0.05$),年份除对水分利

表 2 喷施生长调节剂对高粱产量及农艺性状的影响

Table 2 Effects of spraying growth regulators on yield and agronomic characters of sorghum					
年份 Year	处理 Treatment	产量/(kg·hm ⁻²) Yield	株高/cm Plant height	茎粗/mm Stem diameter	穗长/cm Ear length
2019	CK	7903.98±706.68bc	165.67±1.33a	23.84±0.70b	25.67±1.20b
	S1	8018.51±751.13b	141.00±7.02bc	28.23±1.45a	31.35±1.33a
	S2	8989.49±265.01a	133.00±4.16c	28.23±0.82a	31.00±1.00a
	S3	7963.70±636.81b	142.00±5.13bc	24.24±0.44b	28.36±2.33ab
	D1	7853.93±762.10bc	149.00±7.02b	28.36±2.92a	30.00±0.58a
	D2	7187.59±645.48cd	140.00±4.36bc	27.67±0.51a	30.67±0.88a
	D3	6868.43±436.48d	149.67±4.26b	27.59±2.59a	28.53±1.20ab
2020	CK	7858.38±536.11c	165.56±1.66a	25.75±0.76b	27.33±1.45b
	S1	8606.69±1624.84b	155.33±7.88bc	31.96±2.27a	33.33±1.35a
	S2	8901.67±724.06a	156.33±5.78b	29.80±0.55ab	32.00±0.58a
	S3	8296.31±332.68c	156.30±4.49b	28.21±1.23ab	32.00±1.36a
	D1	7448.43±1228.95c	163.67±7.69a	30.49±0.89a	30.00±2.65ab
	D2	7626.27±158.36c	164.00±4.93a	30.48±1.57a	32.66±0.88a
	D3	7566.57±233.82c	164.67±4.81a	26.18±0.48b	30.35±1.20ab
处理 Treatment(T)		*	*	*	*
年份 Year(Y)		*	NS	NS	NS
T×Y		NS	NS	*	NS

注:同列数据后不同字母表示在同一年份处理间差异显著($P<0.05$)。NS、* 和 ** 分别表示无显著差异、 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平差异显著。下同。

Note: Different letters after the same column of data indicate significant differences in the same year among treatments ($P<0.05$). NS, * and ** indicate no difference, significant difference at $P<0.05$, and significant difference at $P<0.01$ level, respectively. The same below.



注:同组数据不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same group of data indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

图 2 喷施生长调节剂对高粱干物质积累量的影响

Fig.2 Effects of spraying growth regulators on dry matter accumulation of sorghum

用效率没有显著影响外,对其他光合作用参数均有显著或极显著影响。二者互作仅与胞间二氧化碳浓度及气孔导度呈显著差异($P<0.05$)。喷施生长

调节剂显著增加辽粘 3 号净光合速率、蒸腾速率、气孔导度及水分利用效率,降低胞间二氧化碳浓度。喷施过高浓度生长调节剂,光合作用参数呈降低趋势。两年试验结果表明,喷施延缓型调节剂烯效唑(S)的处理净光合速率增加了 8.37%~13.60%、蒸腾速率增加了 3.56%~20.36%、气孔导度增加了 6.69%~26.77%、水分利用效率增加了 5.64%~16.83%;喷施促进型生长调节剂胺鲜酯(D)的处理净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率增幅分别为 0.04%~15.77%、0.64%~11.73%、0.39%~4.70%、0.65%~13.92%。可见,施用延缓型生长调节剂烯效唑,喷施浓度为 60 mg·L⁻¹时对辽粘 3 号高粱的光合作用参数正调控效果最明显,为产量形成奠定了良好的基础。

2.5 生长调节剂对高粱叶绿素荧光参数的影响

两年试验结果表明,喷施生长调节剂显著改善叶绿素荧光参数,两种生长调节剂及年际间效应均无显著差异(图 4)。两种生长调节剂具体表现不同,随着喷施浓度的增加,喷施烯效唑(S)的处理两年 F_v/F_m (PS II 最大光能转化效率)、 F_v/F_0 (PS II 量子效率)和 qP (光化学淬灭系数)均表现为先上升后下降的变化趋势;喷施胺鲜酯(D)的处理 F_v/F_m 和 F_v/F_0 呈下降趋势,2019 年 qP 参数值表现为先上升后下降的变化趋势,2020 年与喷施浓度呈反比,喷施浓度越大, qP 越低;喷施两种生长调节剂的 NPQ 参数值随喷施浓度增加均表现上升的变化趋势。

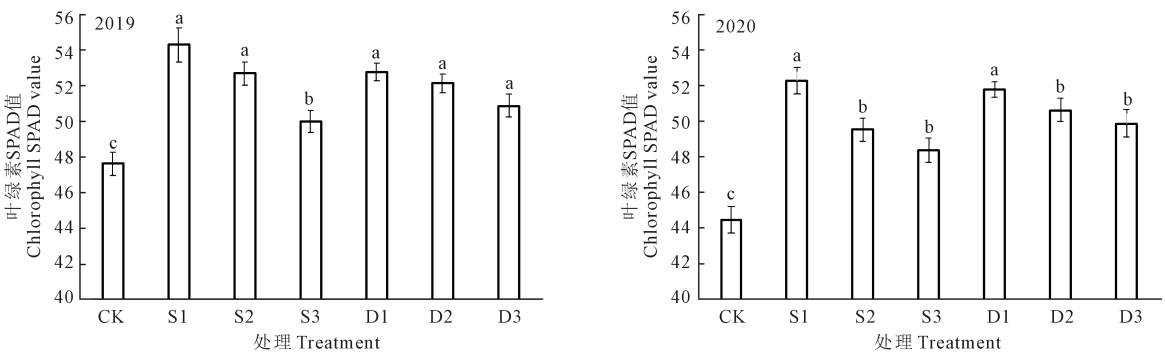


图 3 喷施生长调节剂对高粱灌浆期叶绿素 SPAD 值的影响
Fig.3 Effects of spraying growth regulators on the chlorophyll SPAD value of sorghum at the filling stage

表 3 喷施生长调节剂对高粱光合作用参数的影响
Table 3 Effects of spraying growth regulators on photosynthetic parameters of sorghum

年份 Year	处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate /($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate /($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间二氧化碳浓度 Intercellular carbon dioxide concentration /($\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductance /($\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	水分利用效率 Water use efficiency /($\text{mmol} \cdot \text{mol}^{-1}$)
2019	CK	22.58±2.25b	7.30±0.17b	158.83±13.51a	0.25±0.02b	3.09±0.34b
	S1	26.66±1.18a	7.81±0.14a	143.77±12.88b	0.30±0.01a	3.55±0.26a
	S2	26.78±0.46a	7.61±0.13a	147.75±11.58b	0.32±0.10a	3.61±0.15a
	S3	26.03±2.57a	7.56±0.10a	146.36±11.73ab	0.27±0.02ab	3.54±0.10a
	D1	26.14±0.66a	7.43±0.15ab	150.45±11.77ab	0.26±0.02b	3.52±0.08a
	D2	24.15±1.56ab	7.54±0.11a	154.46±11.96a	0.26±0.02b	3.20±0.57b
	D3	22.59±0.23b	7.50±0.08a	153.55±11.44a	0.26±0.02b	3.11±0.29b
2020	CK	25.93±0.54b	7.76±0.26b	216.33±18.17a	0.53±0.02b	3.14±0.21b
	S1	28.35±1.34a	8.96±0.31ab	213.67±18.74a	0.58±0.02a	3.16±0.22b
	S2	28.43±0.49a	9.34±0.06a	184.34±12.03b	0.58±0.03a	3.14±0.25b
	S3	28.10±0.76a	8.51±0.44b	185.39±14.70b	0.56±0.02a	3.30±0.17a
	D1	27.68±1.08ab	8.67±0.39ab	215.54±17.21a	0.56±0.02a	3.19±0.14b
	D2	27.45±0.45ab	8.32±0.45ab	206.65±19.50ab	0.56±0.03a	3.30±0.22a
	D3	27.25±1.56ab	7.81±0.61b	201.13±20.02ab	0.56±0.02a	3.29±0.24a
处理 Treatment(T)		*	*	*	*	*
年份 Years(Y)		*	**	**	**	NS
T×Y		NS	NS	*	*	NS

喷施延缓型生长调节剂(S)的处理 F_v/F_m 比 CK 增加了 0.51%~2.12%, F_v/F_0 增加了 3.48%~20.50%, qP 增加了 4.63%~41.50%, 均在 S2 时达到最大值; NPQ 降低了 1.70%~14.91%。喷施促进型生长调节剂(D)的处理 F_v/F_m 比 CK 增加了 0.74%~1.92%, 在 D2 时达到最大值; F_v/F_0 增幅为 4.53%~8.71%, 在 D1 时达到最大值; qP 增幅为 4.25%~24.50%, 在 D1 时达到最大值; NPQ 降低了 0.72%~14.91%。延缓型生长调节剂(S)喷施浓度为 60 mg·L⁻¹时,对叶绿素荧光参数的调控效果最明显。

2.6 相关分析

利用 DPS 软件对不同植物生长调节剂处理下辽粘 3 号高粱的主要生长及生理性状进行了相关分析(表 4)。除胞间二氧化碳浓度、叶绿素 SPAD 值和 NPQ 外,其他性状与产量间均呈不同程度的正相关关系,其中单株干物质量与产量呈极显著正相关($R=0.94$)。

光合参数中,产量与蒸腾速率和气孔导度的相关性最大($R=0.76$),其次为净光合速率和水分利用效率($R=0.67$ 、 $R=0.56$)。胞间二氧化碳浓度与其他光合作用参数间均表现负相关,其中与水分利用效率呈显著负相关关系($R=-0.71$)。净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和水分利用效率间存在正相关关系,其中净光合速率与其他光合作用参数值均呈极显著正相关($R=0.85\sim0.96$)。

叶绿素荧光参数中,除 NPQ 外,产量与 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和 qP 均呈显著正相关。非光化学淬灭系数(NPQ)与其他叶绿素荧光参数均呈负相关,其中与 F_v/F_m 差异达到显著水平($R=-0.73$)。PS II 最大光能转化效率(F_v/F_m)与 PS II 量子效率(F_v/F_0)和光化学淬灭系数(qP)间呈显著正相关关系($R=0.72\sim0.77$),与 NPQ 呈显著负相关关系($R=-0.73$)。 F_v/F_0 与 qP 间呈极显著正相关关系($R=0.96$),与 NPQ 呈负相关。

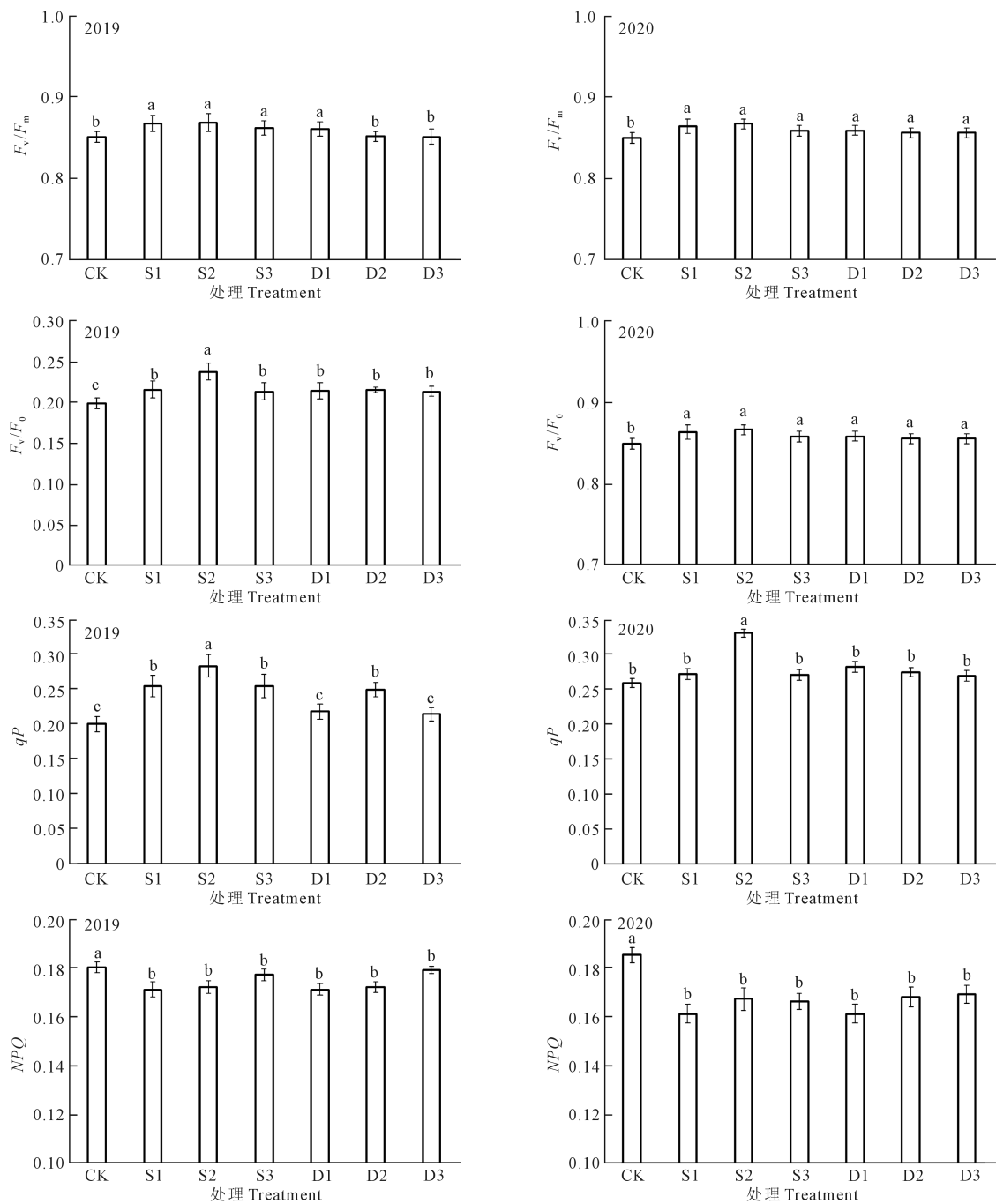


图 4 喷施生长调节剂对高粱灌浆期叶绿素荧光参数的影响

Fig.4 Effects of spraying growth regulators on the chlorophyll fluorescence parameters of sorghum at filling stage

3 讨论与结论

3.1 植物生长调节剂对高粱产量的影响

高粱产量不仅与自身的遗传力相关,外界因素对高粱产量的形成也具有重要影响。本研究采用的促进型和延缓型两种类型生长调节剂中,延缓型生长调节剂烯效唑增产效果显著,喷施浓度为 60 mg · L⁻¹时籽粒产量最高,随着喷施浓度的增加,产量逐渐下降,说明过高浓度生长调节剂抑制辽粘 3

号高粱的籽粒建成,这与范娜等^[2,12]研究结果一致。促进型生长调节剂胺鲜酯处理下,辽粘 3 号高粱籽粒产量与对照未达显著差异水平,与王娜等^[24]报道的叶面喷施烯效唑和胺鲜酯均可显著增加绿豆产量的研究结果略有差异,可能是因为不同作物对两种类型生长调节剂反应不同,促进型生长调节剂胺鲜酯对辽粘 3 号高粱仅起到增“源”的作用,并未形成扩库增源、畅流的多重效应,干物质运转效率降低,经济系数下降。

表 4 辽粘 3 号高粱主要生长及生理性状的相关分析

Table 4 Correlation analysis of main growth and physiological characters of Liaonian 3 sorghum

性状 Trait	产量 Yield	单株干 物质质量 Dry matter mass per plant	叶绿素 SPAD 值 Chlorophyll SPAD value	净光合 速率 Net photosynthetic rate	蒸腾速率 Transpiration rate	胞间二氧 化碳浓度 Intercellular carbon dioxide concentration	气孔导度 Stomatal conductance	水分利 用效率 Water use efficiency	F_v/F_m	F_v/F_0	qP	NPQ
产量 Yield	1.00	0.94 **	0.29	0.67 *	0.76 *	-0.58	0.76 *	0.56 *	0.59 *	0.70 *	0.77 *	-0.04
单株干物质质量 Dry matter mass per plant		1.00	0.28	0.82 *	0.86 **	-0.62	0.83 *	0.73 *	0.71 *	0.58	0.72 *	-0.23
叶绿素 SPAD 值 Chlorophyll SPAD value			1.00	0.69	0.70	-0.17	0.63	0.60	0.80 *	0.35	0.41	-0.83 *
净光合速率 Net photosynthetic rate				1.00	0.95 **	-0.63	0.85 **	0.96 **	0.83 **	0.60	0.73 *	-0.68
蒸腾速率 Transpiration rate					1.00	-0.59	0.94 **	0.83 *	0.92 **	0.72 *	0.84 **	-0.61
胞间二氧化碳浓度 Intercellular carbon dioxide concentration						1.00	-0.71	-0.71 *	-0.58	-0.70	-0.74 *	0.57
气孔导度 Stomatal conductance							1.00	0.73 *	0.97 **	0.80 *	0.86 **	-0.62
水分利用效率 Water use efficiency								1.00	0.7	0.51	0.64	-0.71 *
F_v/F_m									1.00	0.72 *	0.77 *	-0.73 *
F_v/F_0										1.00	0.96 **	-0.45
qP											1.00	-0.50
NPQ												1.00

3.2 植物生长调节剂对高粱农艺性状及干物质积累的影响

诸多研究表明,生长调节剂的主要作用是抑制赤霉素合成,打破内源激素的平衡,减少顶端优势,从而促进群体稳定生长^[24-28]。采用合理的化控技术可有效调控群体结构,最终实现增产增效^[17,29]。本研究中生长调节剂的使用引起激素发生再分配、再平衡并合成受体复合物,使植物表现出生长受抑的结果,施用延缓型生长调节剂烯效唑显著降低了辽粘 3 号高粱的株高,显著增加了茎粗和穗长。

较高的干物质积累量是源库系统结构与功能协调的结果,源足、库大是高产的基础^[6-7,15]。应用化控剂可促进源库形成,增加干物质积累^[17,29]。刘春娟、闫艳红等^[7,16]研究表明,叶面喷施烯效唑显著提高了大豆干物质积累量和产量。本研究中喷施烯效唑显著提高辽粘 3 号高粱的干物质积累量,干物质增加程度与生长调节剂喷施浓度呈负相关,这与刘春娟等^[7]在大豆、薛丁丁等^[20]在甜高粱中的研究结果一致。

3.3 植物生长调节剂对高粱光合作用的影响

光合作用是植物生长发育的基础,也是评价生长调节剂的重要依据^[22]。前人研究结果表明,在光

照和二氧化碳浓度等生态因子改变时,烯效唑处理仍能提高作物叶片光合速率^[30]。研究表明,喷施低浓度多效唑能提高玉米净光合速率、气孔导度、水分利用效率,改善光合性能,积累更多的光合产物^[31]。张飞等^[19]研究认为矮壮素处理在灌浆期对光合作用起到显著促进作用。本研究中喷施延缓型生长调节剂烯效唑浓度为 60 mg · L⁻¹时,显著改善了辽粘 3 号高粱的光合参数,气孔导度与净光合速率、蒸腾速率同时上升,说明喷施生长调节剂主要改善气孔开放程度,进而增加净光合速率和蒸腾速率。

叶片叶绿素含量直接反映出光合器官功能的强弱。研究表明,烯效唑能够提高总叶绿素含量,对作物生理学特性有显著的正向调节作用^[23,32]。研究表明,干旱条件下提前喷施烯效唑使玉米叶片叶绿素含量降低幅度减小。本研究发现低浓度烯效唑对辽粘 3 号高粱的功能叶片叶绿素 SPAD 值有显著提升效果。这与前人报道用烯效唑处理其他作物的研究结果基本一致^[31-34]。叶绿素荧光与植物光合作用密切相关,可用于植物生长发育及生理变化监测。夏庆平等^[30]测定低氧胁迫下甜瓜幼苗的叶绿素荧光参数,表明外源 GABA 能显著提高甜

瓜幼苗的最大光化学效率和 PS II 光合电子传递量子效率等叶绿素荧光参数值,显著降低非光化学淬灭系数。本研究喷施生长调节剂对辽粘 3 号高粱的 F_v/F_m 无显著影响,显著增加了 F_v/F_0 (PS II 量子效率) 和 qP (光化学淬灭系数),当喷施浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,对辽粘 3 号高粱的叶绿素荧光参数调控效果最明显,这与人应用植物生长调节剂调控叶绿素荧光参数的结论有差异^[24,30],可能是由于不同类型生长调节剂适用作物不同。

植物生长调节剂通过扩源、增库及协调碳氮代谢的平衡,最终实现了高粱增产。本研究相关分析表明,外源施用延缓型生长调节剂烯效唑可有效调控株型向趋利避害的方面转化,通过提高光系统内部电子传递效率改善叶绿素荧光参数特性,提高群体光合效率 and 水分利用率,进而增加群体干物质积累。因此,在生产中喷施烯效唑来调控高粱生长发育及源库关系是可行的,综合分析,烯效唑喷施浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,辽粘 3 号高粱的增产效果最明显。

参考文献:

- [1] 邹剑秋,王艳秋,柯福来.高粱产业发展现状及前景展望[J].山西农业大学学报(自然科学版),2020,40(3):1-8.
ZOU J Q, WANG Y Q, KE F L. Development status and prospect of sorghum industry in China [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 40(3): 1-8.
- [2] 范娜,白文斌,董良利,等.2 种生长调节剂对高粱生长、产量和品质影响的研究[J].农学学报,2015,5(10):6-10.
FAN N, BAI W B, DONG L L, et al. Effects of two kinds of plant growth regulator on sorghum growth, yield and quality [J]. Journal of Agriculture, 2015, 5(10): 6-10.
- [3] 邹剑秋.高粱育种与栽培技术研究新进展[J].中国农业科学,2020,53(14):2769-2773.
ZOU J Q. New research progress on sorghum breeding and cultivation techniques [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(14): 2769-2773.
- [4] 李顺国,刘猛,刘斐,等.中国高粱产业和种业发展现状与未来展望[J].中国农业科学,2021,54(3):471-482.
LI S G, LIU M, LIU F, et al. Current status and future prospective of sorghum production and seed industry in China [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(3): 471-482.
- [5] 王艳秋,张飞,朱凯,等.适于机械化收获优质酿造高粱杂交种辽杂 50 选育及栽培技术[J].辽宁农业科学,2020,(1):83-85.
WANG Y Q, ZHANG F, ZHU K, et al. Breeding and cultivation techniques of Liaoza 50 sorghum hybrids with suitable for mechanized harvesting and high quality for brewing traits [J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2020, (1): 83-85.
- [6] 赵晶晶,冯乃杰,郑殿峰,等.植物生长调节剂对马铃薯叶片生理代谢及产量品质的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(6):154-158,165.
ZHAO J J, FENG N J, ZHENG D F, et al. Effects of plant growth reg-

- ulators on leaf physiology, yield and quality of potato [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(6): 154-158, 165.
- [7] 刘春娟,冯乃杰,郑殿峰,等.植物生长调节剂 S3307 和 DTA-6 对大豆源库碳水化合物代谢及产量的影响[J].中国农业科学,2016,49(4):657-666.
LIU C J, FENG N J, ZHENG D F, et al. Effects of plant growth regulators S3307 and DTA-6 on carbohydrate content and yield in soybean [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2016, 49(4): 657-666.
- [8] 邹剑秋,王艳秋,李金红,等.优异高粱雄性不育系 01-26A 的组配降秆效应及其分子机理[J].中国农业科学,2020,53(14):2814-2827.
ZOU J Q, WANG Y Q, LI J H, et al. Dwarfing effect and molecular mechanism of an elite sorghum male sterile line 01-26A in its hybrids [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(14): 2814-2827.
- [9] SNIGIREVA O M, VEDERNIKOV Y E, BATALOVA G A. Formation of the photosynthetic apparatus in spring wheat variety Bazhenka under the effect of growth regulators [J]. Russian Agricultural Sciences, 2021, 47(1): 6-10.
- [10] 徐田军,吕天放,陈传永,等.种植密度和植物生长调节剂对玉米茎秆性状的影响及调控[J].中国农业科学,2019,52(4):629-638.
XU T J, LV T F, CHEN C Y, et al. Effects of plant density and plant growth regulator on stalk traits of maize and their regulation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(4): 629-638.
- [11] KHAN N. Application of plant growth promoting microorganism and plant growth regulators in agricultural production and research [J]. Agronomy, 2021, 11(3): 524.
- [12] 范娜,白文斌,李振海,等.4 种生长调节剂对高粱矮化效果的影响[J].山西农业科学,2014,42(5):443-444,489.
FAN N, BAI W B, LI Z H, et al. Effects of four plant growth regulators on the dwarf of sorghum [J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42(5): 443-444, 489.
- [13] YANG R, JIANG Y, XIU L L, et al. Effect of chitosan pre-soaking on the growth and quality of yellow soybean sprouts [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(4): 1596-1603.
- [14] AHMAD I, AHMAD S, YANG X N, et al. Effect of uniconazole and nitrogen level on lodging resistance and yield potential of maize under medium and high plant density [J]. Plant Biology, 2021, 23(3): 485-496.
- [15] LUO K, XIE C, WANG J, et al. Uniconazole, 6-benzyladenine, and diethyl aminoethyl hexanoate increase the yield of soybean by improving the photosynthetic efficiency and increasing grain filling in maize-soybean relay strip intercropping system [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 40(5): 1869-1880.
- [16] 闫艳红,王燕,杨文钰,等.叶面喷施烯效唑对套作大豆花后碳氮代谢及产量的影响[J].大豆科学,2015,34(1):75-81.
YAN Y H, WAN Y, YANG W Y, et al. Effect of spraying uniconazole on carbon and nitrogen metabolism and yield of relay strip intercropping soybean [J]. Soybean Science, 2015, 34(1): 75-81.
- [17] 赵建武,范娜,白文斌,等.不同密度和生长调节剂对高粱产量及农艺性状影响的研究[J].中国农学通报,2017,33(5):6-9.
ZHAO J W, FAN N, BAI W B, et al. Effects of different densities and growth regulators on yield and agronomic characters of sorghum [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2017, 33(5): 6-9.
- [18] 周宇飞,闫彤,张姣,等.外源 IAA 对高粱幼苗内源激素含量及分蘖

发生的影响[J].生态学杂志,2017,36(8):2191-2197.

ZHOU Y F, YAN T, ZHANG J, et al. Effects of exogenous IAA application on endogenous hormone contents and tillering in sorghum [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(8): 2191-2197.

[19] 张飞,王艳秋,朱凯,等.矮壮素施用对甜高粱品种抗倒及光合物质生产的影响[J].西南农业学报,2015,28(5):1972-1976.

ZHANG F, WANG Y Q, ZHU K, et al. Effect of chlormequat chloride application on lodging character, photosynthetic and material production of sweet sorghum[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(5): 1972-1976.

[20] 薛丁丁,王官,张阳,等.烯效唑对甜高粱主要农艺性状及倒伏率的影响[J].山西农业科学,2020,48(9):1402-1405.

XUE D D, WANG G, ZHANG Y, et al. Effects of uniconazole on main agronomic traits and lodging rate of sweet sorghum[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(9): 1402-1405.

[21] 王桂青.高粱喷施乙烯利对矮化增产效应研究[J].山西农业科学, 2000,28(3):32-34.

WANG G Q. The effect of spraying ethylene on the increasing of sorghum yield[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2000, 28 (3): 32-34.

[22] 吴琼,丁凯鑫,余明龙,等.新型植物生长调节剂 B2 对玉米光合荧光特性及产量的影响[J].作物杂志,2020,(5):174-181.

WU Q, DING K X, YU M L, et al. Effects of new plant growth regulator b2 on photosynthetic fluorescence characteristics and yield of maize[J]. Crops, 2020, (5): 174-181.

[23] SARWAR M, SALEEM M F, ULLAH N, et al. Exogenously applied growth regulators protect the cotton crop from heat-induced injury by modulating plant defense mechanism[J]. Scientific Reports, 2018, 8 (1):17086.

[24] 王娜,杨思敏,刘蓓蓓,等.植物生长调节剂对绿豆干物质积累动态与产量的影响[J].中国农业大学学报,2021,26(3):10-17.

WANG N, YANG S M, LIU B B, et al. Regulation of plant growth regulator on dry matter accumulation and yield of mung bean [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(3): 10-17.

[25] 王利锋,马娟,王浩,等.不同生长调节剂处理对玉米农艺性状及产量的影响[J/OL].分子植物育种: 1-14 (2020-12-15) [2021-01-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20201215.1437.004.html>.

WANG L F, MA J, WANG H, et al. Effects of different growth regulators on agronomic characters and grain yield of maize varieties[J]. Molecular Plant Breeding: 1-14 (2020-12-15) [2021-01-11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20201215.1437.004.html>.

[26] HUANG G M, LIU Y R, GUO Y L, et al. A novel plant growth regulator improves the grain yield of high-density maize crops by reducing stalk lodging and promoting a compact plant type[J]. Field Crops Research, 2021, 260: 107982.

[27] 樊海潮,顾万荣,杨德光,等.化控剂对东北春玉米茎秆理化特性及抗倒伏的影响[J].作物学报,2018,44(6):909-919.

FAN H C, GU W R, YANG D G, et al. Effect of chemical regulators on physical and chemical properties and lodging resistance of spring maize stem in northeast China[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44 (6): 909-919.

[28] AHMAD I, KAMRAN M, MENG X P, et al. Effects of plant growth regulators on seed filling, endogenous hormone contents and maize production in semiarid regions [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2019, 38(4): 1467-1480.

[29] 张伟,张阳,赵威军,等.烯效唑对甜高粱农艺性状及倒伏率的影响[J].作物杂志,2017,(4):113-116.

ZHANG W, ZHANG Y, ZHAO W J, et al. Effects of spraying uniconazole on agronomic traits and lodging rate of sweet sorghum[J]. Crops, 2017,(4): 113-116.

[30] 夏庆平,高洪波,李敬蕊.γ-氨基丁酸(GABA)对低氧胁迫下甜瓜幼苗光合作用和叶绿素荧光参数的影响[J].应用生态学报,2011, 22(4):999-1006.

XIA Q P, GAO H B, LI J R. Effects of γ-aminobutyric acid on the photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of muskmelon seedlings under hypoxia stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(4): 999-1006.

[31] 姜颖,左官强,王晓楠,等.烯效唑浸种对干旱胁迫下工业大麻幼苗形态、渗透调节物质及内源激素的影响[J].干旱地区农业研究, 2020,38(3):74-80.

JIANG Y, ZUO G Q, WANG X N, et al. Effects of soaking seeds with uniconazole on morphology, osmotic regulators and endogenous hormones of industrial hemp seedlings under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(3): 74-80.

[32] 李璇,项洪涛,何宁,等.烯效唑对苗期低温胁迫下红小豆产量及茎部抗逆生理指标的影响[J].干旱地区农业研究,2020,38(2):199-206,213.

LI W, XIANG H T, HE N, et al. Effects of uniconazole on yield and stem anti-stress physiology of adzuki bean under low temperature stress during seedling stage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(2): 199-206, 213.

[33] 孙宁,边少锋,孟祥盟,等.密植条件下春玉米茎叶性状对植物生长调节剂的响应[J].东北农业科学,2020,45(6):8-10.

SUN N, BIAN S F, MENG X M, et al. Response of spring maize stem and leaf traits and yield to plant growth regulators under dense planting condition [J]. Journal of Northeast Agricultural Sciences, 2020, 45(6): 8-10.

[34] ABABAF M, OMIDI H, BAKHSHANDEH A. Changes in antioxidant enzymes activities and alkaloid amount of *Catharanthus roseus* in response to plant growth regulators under drought condition[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 167: 113505.